

Sistemi Binari

A.A.Nucita

Unisalento & INFN & INAF

PLS 2023

Dati di fatto:

- 1) Per «chance» si dovrebbe osservare solo qualche stella che casualmente si trova vicino ad un altro oggetto (le binarie prospettiche sono pura coincidenza)
- 2) Le stelle non sono solitarie nello spazio. Circa il 50%-70% delle stelle è in forma di sistemi binari o multipli.
- 3) In un sistema multiplo, le stelle orbitano intorno al comune centro di massa.
- 5) Questo non è casuale dal momento che le stelle nascono in gruppi da una nebulosa che si frammenta.
- 6) Le masse delle stelle si possono misurare **solo** se esse sono in un sistema binario.

Binarie prospettiche



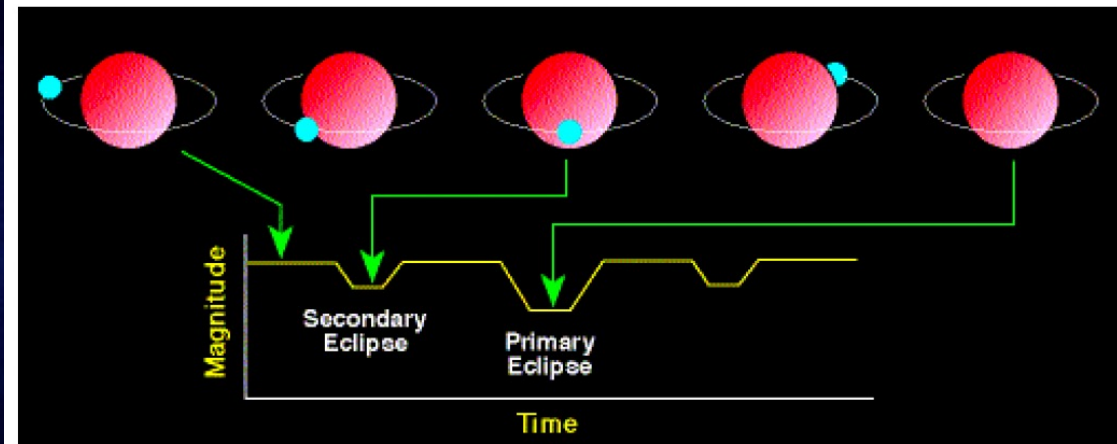
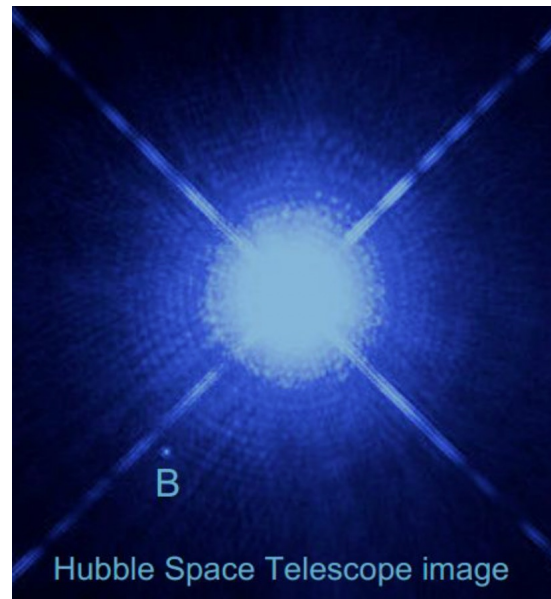
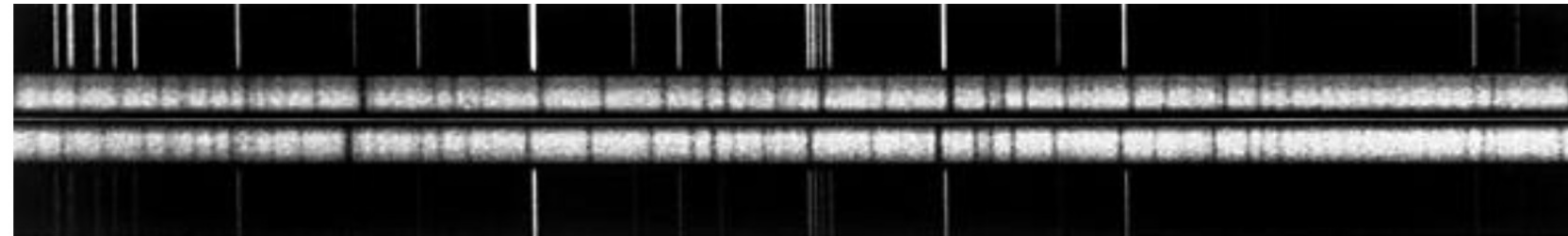
Binarie Fisiche

Binarie visuali

Binarie spettroscopiche

Binarie astrometriche

Binarie a eclisse



Breve storia della Dinamica

Aristotele (IV sec a.C)

Lo stato naturale dei corpi è la quiete.
Per mantenere un corpo in movimento
è necessario imprimergli
continuamente una «forza» in assenza
della quale questo rallenterà e si
fermerà.



Galileo (1610 circa)

Lo stato naturale dei corpi è il moto
rettilineo uniforme (cioè a velocità
costante) per un tempo «indefinito».
Newton deduce che qualsiasi «forza»
che agisce sul corpo ne modifica lo stato
di moto inducendo un'accelerazione.



Galileo (Padova
1607) scrive ...a
principiar il moto è
ben necessario il
movente, ma a
continuarlo basta il
non aver contrasto...

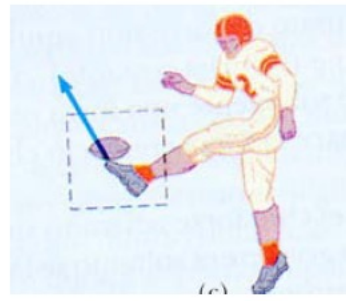
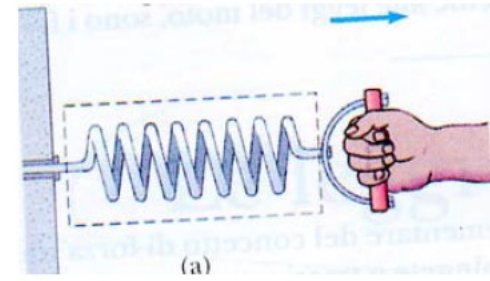
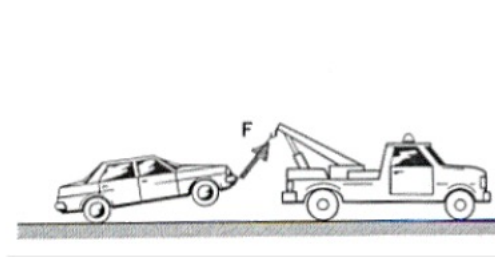
Newton (1687)

Possiamo dare una definizione operativa di »forza« come qualsiasi entità che spinge o tira un oggetto.

Una forza è una grandezza **vettoriale** cioè

una trazione o spinta ha sempre

- ✗ una intensità (il modulo)
- ✗ una direzione
- ✗ un verso



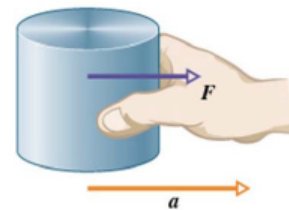
Gli esperimenti concettuali di Newton portano a definire le tre leggi della dinamica:

Prima legge di Newton [legge di inerzia]

*Un corpo rimane nel suo stato di **quiete** o nel suo stato di **moto rettilineo a velocità costante** se una forza risultante non nulla non lo costringe a variare il suo stato di moto*

✗ **assenza di forze** implica assenza di variazione di moto, cioè assenza di accelerazione

$$\Sigma \vec{F} = 0 \Rightarrow \vec{a} = 0$$



una forza F applicata ad un corpo gli imprime una accelerazione

Sistemi di riferimento inerziali

La prima legge di Newton
non vale in tutti i sistemi di riferimento

*un sistema di riferimento è **inerziale**
se in esso vale la prima legge di Newton*

*qualunque sistema di riferimento in **moto** con **velocità costante** rispetto ad un riferimento inerziale e anch'esso **inerziale***

I SISTEMI DI RIFERIMENTO ACCELERATI **NON** SONO INERZIALI

NOTA!

ESEMPIO



Uno scuola-bus fa una brusca frenata e gli zaini sul pavimento scivolano in avanti.

Cosa deduciamo?

Gli zaini **continuano** il loro stato di moto cioè mantengono la velocità che avevano prima della frenata e il loro moto non è causato da forze e **NON** vale la legge di inerzia

la **Terra NON** è un sistema inerziale

$$a_c = 4.4 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}^2$$

accelerazione **centripeta**
verso il Sole [moto attorno al sole]

$$a_c = 3.37 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}^2$$

accelerazione **centripeta**
verso il centro della terra
[moto attorno all'asse terrestre]

Poiché queste accelerazioni sono piccole rispetto all'accelerazione di gravità (sulla superficie terrestre 9.8 m/s^2) possiamo assumere che un sistema di riferimento attaccato alla Terra **SIA** (con buona approssimazione) **INERZIALE!**

NOTA!

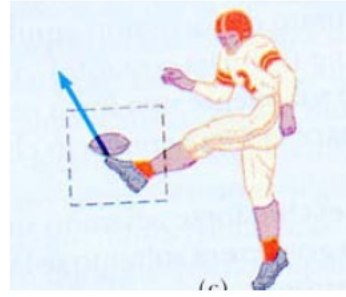
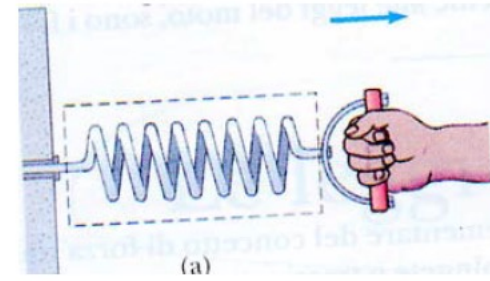
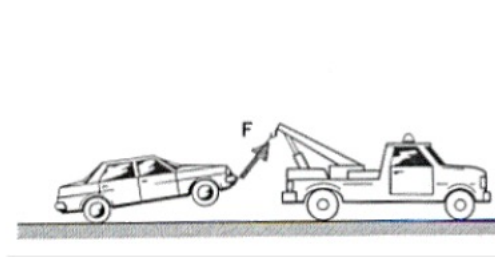
Newton (1687)

Possiamo dare una definizione operativa di »forza« come qualsiasi entità che spinge o tira un oggetto.

Una forza è una grandezza **vettoriale** cioè

una trazione o spinta ha sempre

- ✗ una intensità (il modulo)
- ✗ una direzione
- ✗ un verso



Gli esperimenti concettuali di Newton portano a definire le tre leggi della dinamica:

Seconda legge di Newton

L'accelerazione di un oggetto è

- ✗ **direttamente** proporzionale alla **forza** risultante su di esso
- ✗ **inversamente** proporzionale alla sua **massa**

$$\vec{F}_{net} = \Sigma \vec{F} = m\vec{a} \quad \left\{ \begin{array}{l} \Sigma F_x = m a_x \\ \Sigma F_y = m a_y \\ \Sigma F_z = m a_z \end{array} \right.$$

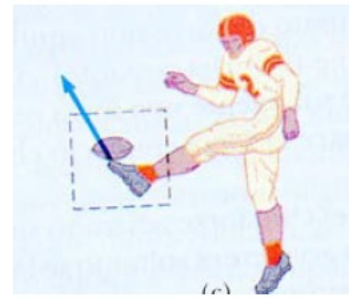
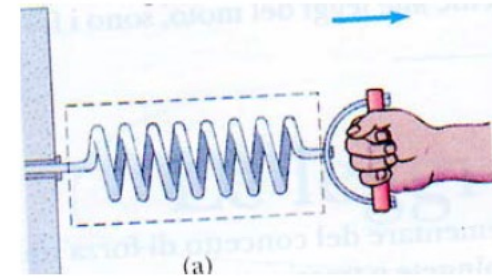
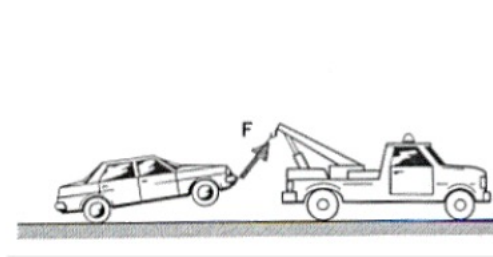
Newton (1687)

Possiamo dare una definizione operativa di »forza« come qualsiasi entità che spinge o tira un oggetto.

Una forza è una grandezza **vettoriale** cioè

una trazione o spinta ha sempre

- ✗ una intensità (il modulo)
- ✗ una direzione
- ✗ un verso



Gli esperimenti concettuali di Newton portano a definire le tre leggi della dinamica:

La massa inerziale

Osservazione: una forza produce accelerazioni di intensità diversa su corpi diversi

esempio:

stesso calcio a

palla da baseball → **grande** accelerazione

palla da bowling → **piccola** accelerazione

la differenza di accelerazione è dovuta alla **differenza di massa**

corpi **meno** massicci ricevono
una accelerazione **maggiore**

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1}$$

MASSA INERZIALE: E' quella proprietà di un corpo che si oppone alla variazione di stato del suo moto

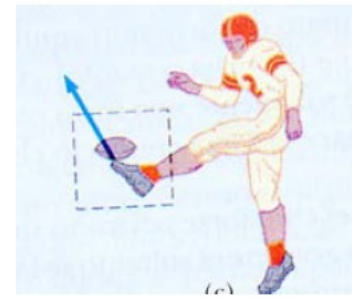
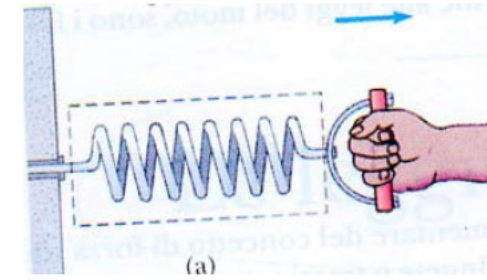
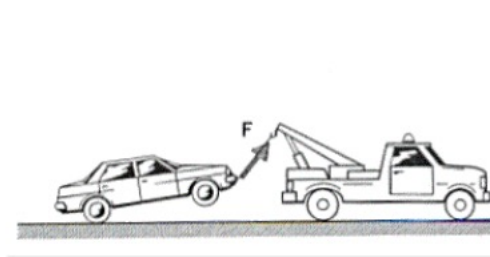
Newton (1687)

Possiamo dare una definizione operativa di »forza« come qualsiasi entità che spinge o tira un oggetto.

Una forza è una grandezza **vettoriale** cioè

una trazione o spinta ha sempre

- ✗ una intensità (il modulo)
- ✗ una direzione
- ✗ un verso



Gli esperimenti concettuali di Newton portano a definire le tre leggi della dinamica:

Terza legge di Newton

[principio di azione e reazione]

Se due corpi interagiscono le forze esercitate da un corpo sull'altro sono

- ✗ *uguali* in modulo e direzione
- ✗ *opposte* in verso

$$\vec{F}_{12} = -\vec{F}_{21}$$



Tutte le forze possono essere classificate in

FORZE DI CONTATTO: esprimono il risultato di un **contatto fisico** tra i corpi

FORZE A DISTANZA: agiscono attraverso lo spazio vuoto come nel caso della forza di tipo elettromagnetico e gravitazionale. Un'analisi più approfondita rivela che **TUTTE** le forze sono a **DISTANZA**!

In fisica l'azione a distanza è mal vista (perché presuppone un'interazione istantanea) e si introduce il concetto di **CAMPO DI FORZA**.

In termini intuitivi: un corpo sorgente di un campo di forze (ad esempio gravitazionale) ha tutto il tempo per perturbare lo spazio in un punto a una distanza generica da esso. Ci accorgeremmo dell'esistenza del campo (e della sua intensità) in quel dato punto solo studiando gli effetti (di forza agente) su di una particella di prova.

NOTA!

Tra il 1608 ed il 1619 Johannes Keplero formula tre leggi empiriche (basate su osservazioni astronomiche) che permettono di descrivere il moto dei pianeti intorno al Sole. Sono note come **legge delle orbite ellittiche, legge delle aree e legge dei periodi**



I^a Tutti i pianeti si muovono su orbite piane, nel caso della Terra l'orbita è ellittica e il sole occupa uno dei due fuochi.

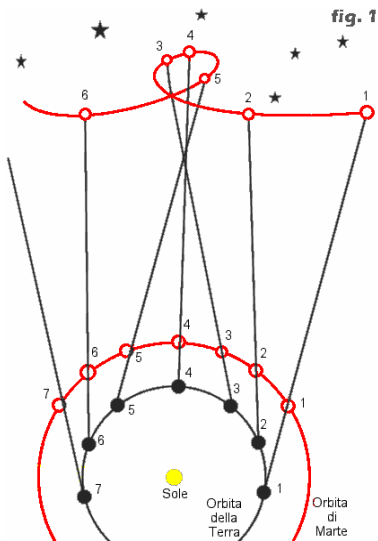
(esistenza di una forza centrale)

II^a Il segmento che collega un pianeta al sole spazza aree uguali in tempi uguali.

(Legge della costanza della velocità areolare)

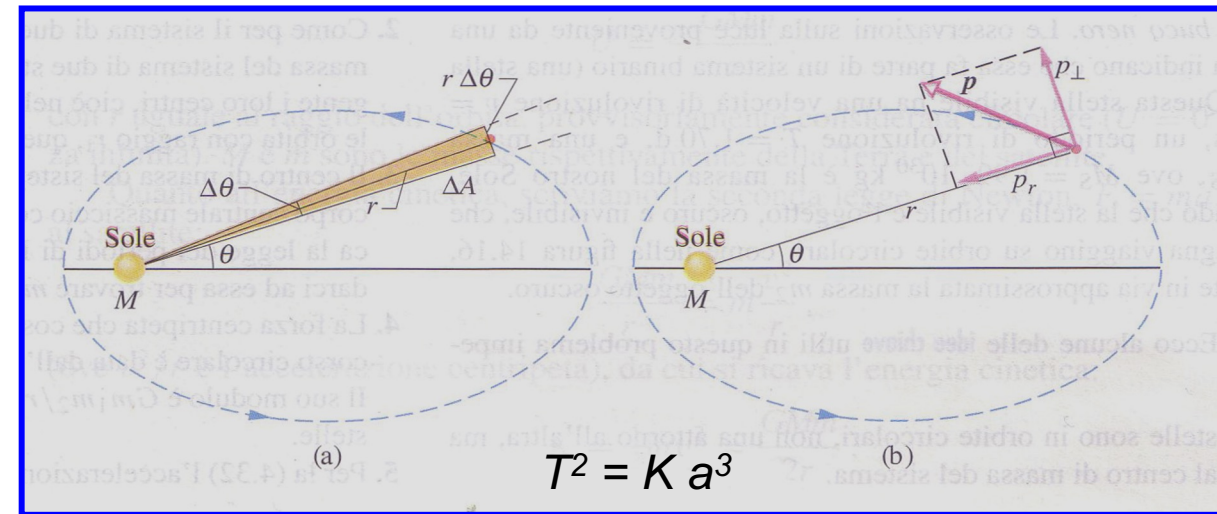
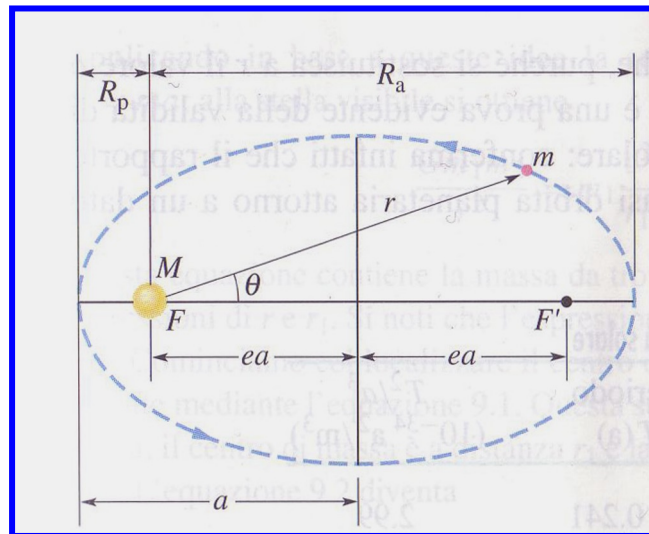
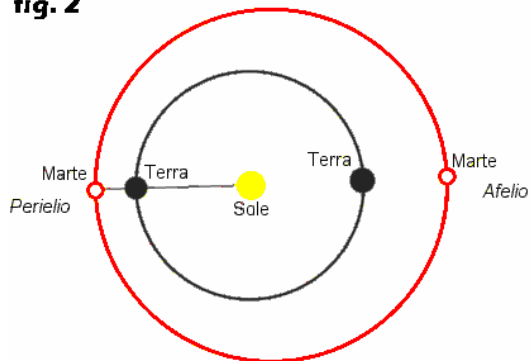
III^a Il quadrato del periodo di un pianeta è pari al cubo del semiasse maggiore della sua orbita.

(verifica la legge della gravitazione)



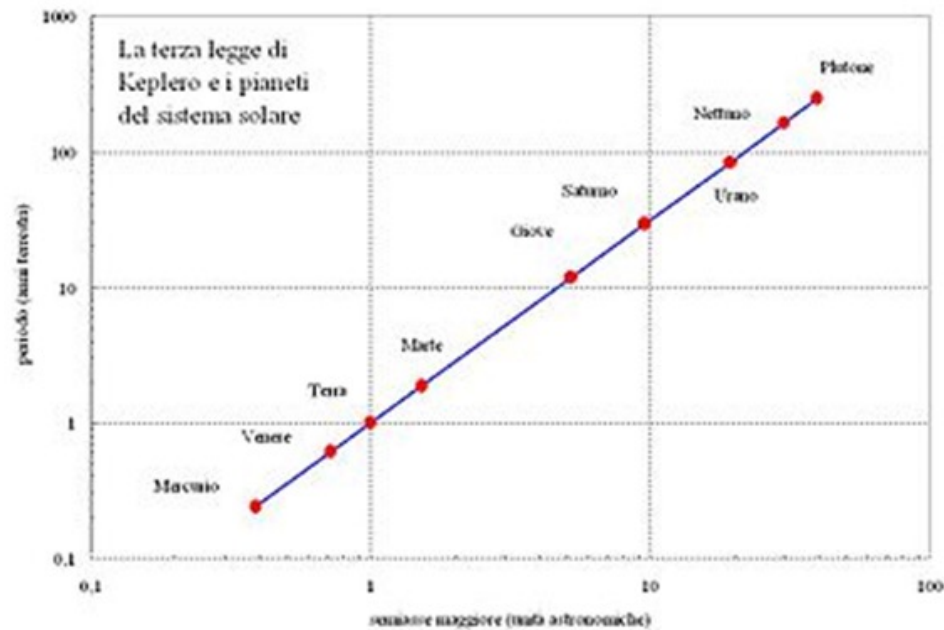
- Smonta tutta la teoria **geocentrica** secondo la quale l'orbita di Marte, osservata dalla Terra, ha un andamento retrogrado non compatibile con un solo centro di attrazione.
- Tuttavia, il modello **eliocentrico** è semplice, afferma che tutte le orbite giacciono su un piano, non contempla orbite «retrogradi» ed è quindi possibile prevedere una forza centrale.
- Per definire una orbita basta conoscere la sua eccentricità **e** ed il suo semiasse maggiore **a**.

fig. 2



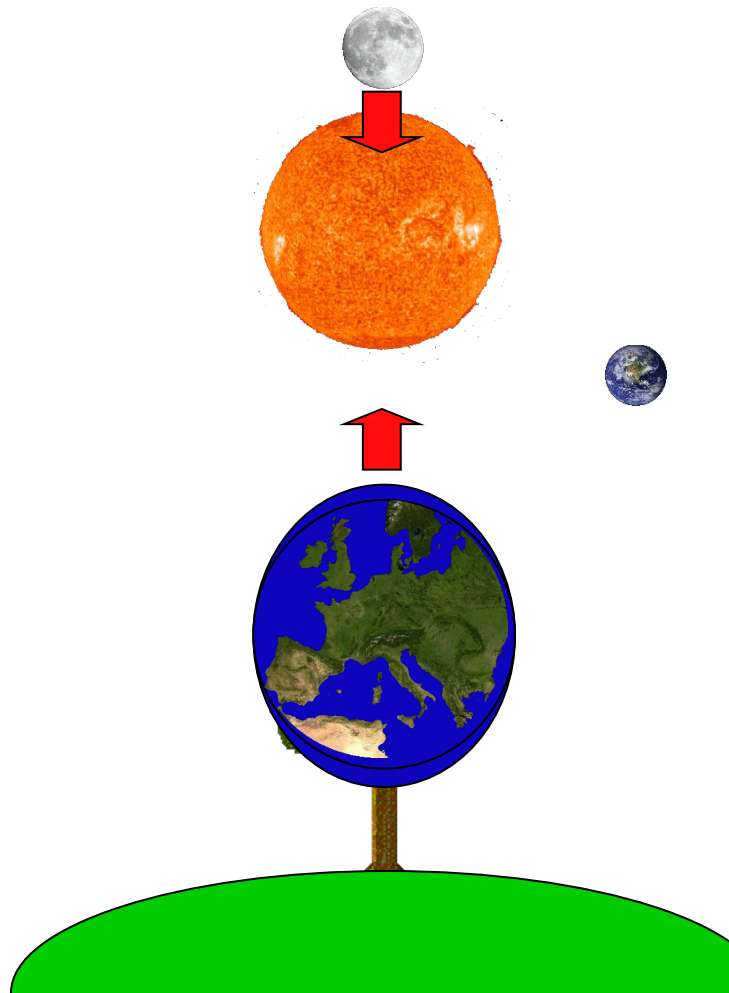
Verifica della III Legge di Keplero

Possiamo verificare la validità della terza legge di Keplero riportando in un grafico il periodo delle orbite e la distanza media dei pianeti nel Sistema Solare. Il rapporto T^2/r^3 vale $2,98 \pm 0.03$

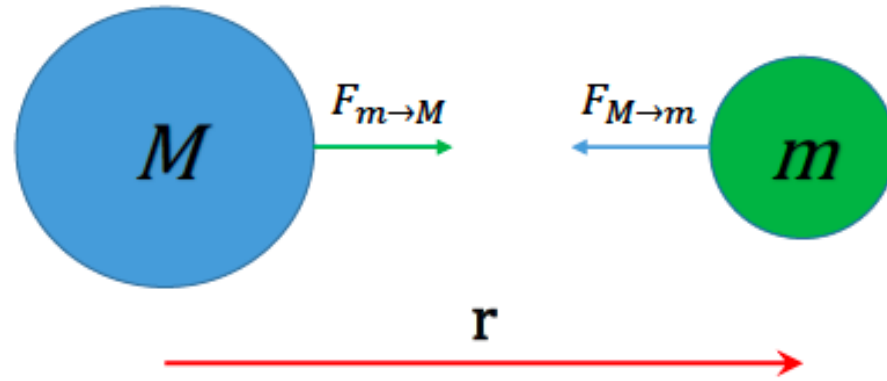


Pianeta	Semiasse r ($10^{10}m$)	Periodo T (a)	T^2/r^3 ($10^{-34} a^2/m^3$)
Mercurio	5,79	0,241	2,99
Venere	10,8	0,615	3,00
Terra	15,0	1,00	2,96
Marte	22,8	1,88	2,98
Giove	77,8	11,9	3,01
Saturno	143	29,5	2,98
Urano	287	84,0	2,98

E ALLA FINE VENNE NEWTON (1642-1726)



Nel 1687, Newton formula la teoria della gravitazione universale ed introduce il concetto di **MASSA GRAVITAZIONALE**



$$-\vec{F} = \boxed{M} \vec{a}$$

$$\vec{a} = \frac{Gm}{r^2} \hat{r}$$

$$\vec{F} = -\frac{G\boxed{M}\boxed{m}}{r^2} \hat{r}$$

$$\vec{F} = \boxed{m} \vec{a}$$

$$\vec{a} = -\frac{GM}{r^2} \hat{r}$$

E per poter essere consistente con la prima legge della dinamica:
MASSA GRAVITAZIONALE = MASSA INERZIALE (Principio di equivalenza)

Non esiste esperimento col quale un osservatore possa capire di essere fermo in un campo gravitazionale o in moto accelerato, né di essere in assenza di campo gravitazionale o in caduta libera

Le leggi della dinamica, la legge della gravitazione Universale ed il Principio di Equivalenza ci permettono di giustificare teoricamente la III legge di Keplero

(quadrato del tempo impiegato a percorrere un'orbita è proporzionale al cubo della distanza media sole- pianeta)

Infatti:

Consideriamo la seconda legge di Newton

$$\underline{F = ma}$$

Nel caso dei pianeti la forza è la forza della gravitazione universale e se ipotizziamo un moto circolare, potremo dedurre la terza legge di Keplero

$$\vec{F} = m\vec{a} \quad G \frac{mM}{r^2} = m\omega^2 r$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad G \frac{mM}{r^2} = m \left(\frac{2\pi}{T} \right)^2 r$$

$$G \frac{M}{r^2} = \frac{4\pi^2}{T^2} r \quad T^2 = \left(\frac{4\pi^2}{GM} \right) r^3$$

$$P = \left(\frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} a^3 \right)^{1/2}$$

$$P^2 = K r^3$$

Cavendish misura G

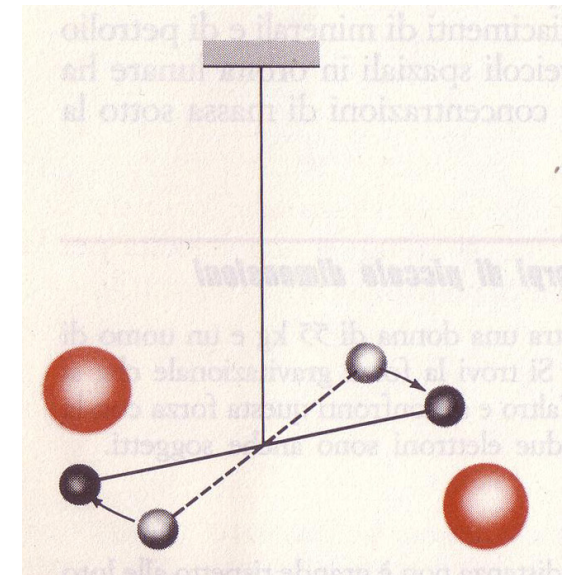
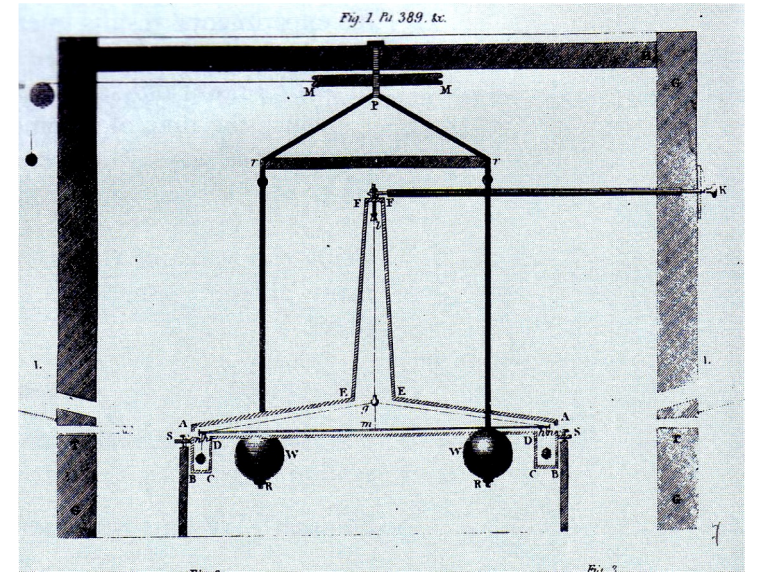
■ Nel 1798 H. Cavendish misurò tramite una bilancia a torsione la costante G che compare nell'equazione della Gravitazione Universale :

$$\vec{F} = -G \frac{mM}{r^2} \hat{r}$$

■ All'equilibrio l'attrazione di Gravità è uguale alla torsione del filo che tiene il bilanciante.

- r è la distanza fra le sfere a riposo,
- m e M sono le masse delle sfere.

$$G = \frac{Fr^2}{mM} = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2$$



Attrazione Gravitazionale

- La leggendaria mela di Newton cadrà sulla Terra secondo $\underline{F} = m\underline{a}$ con $\underline{a} = \underline{g}$

Come si ricava il valore di g dalla legge della gravitazione universale

$$mg = G \frac{mM_T}{r^2} \Rightarrow g = G \frac{M_T}{r^2}$$

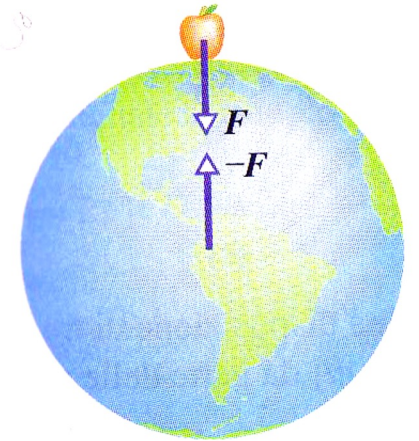
$$r = R_T \Rightarrow g = G \frac{M_T}{R_T^2} = 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ [m}^3\text{/(kgsec}^2\text{)]}$$

$$M_t = 5.98 \times 10^{24} \text{ [kg]}$$

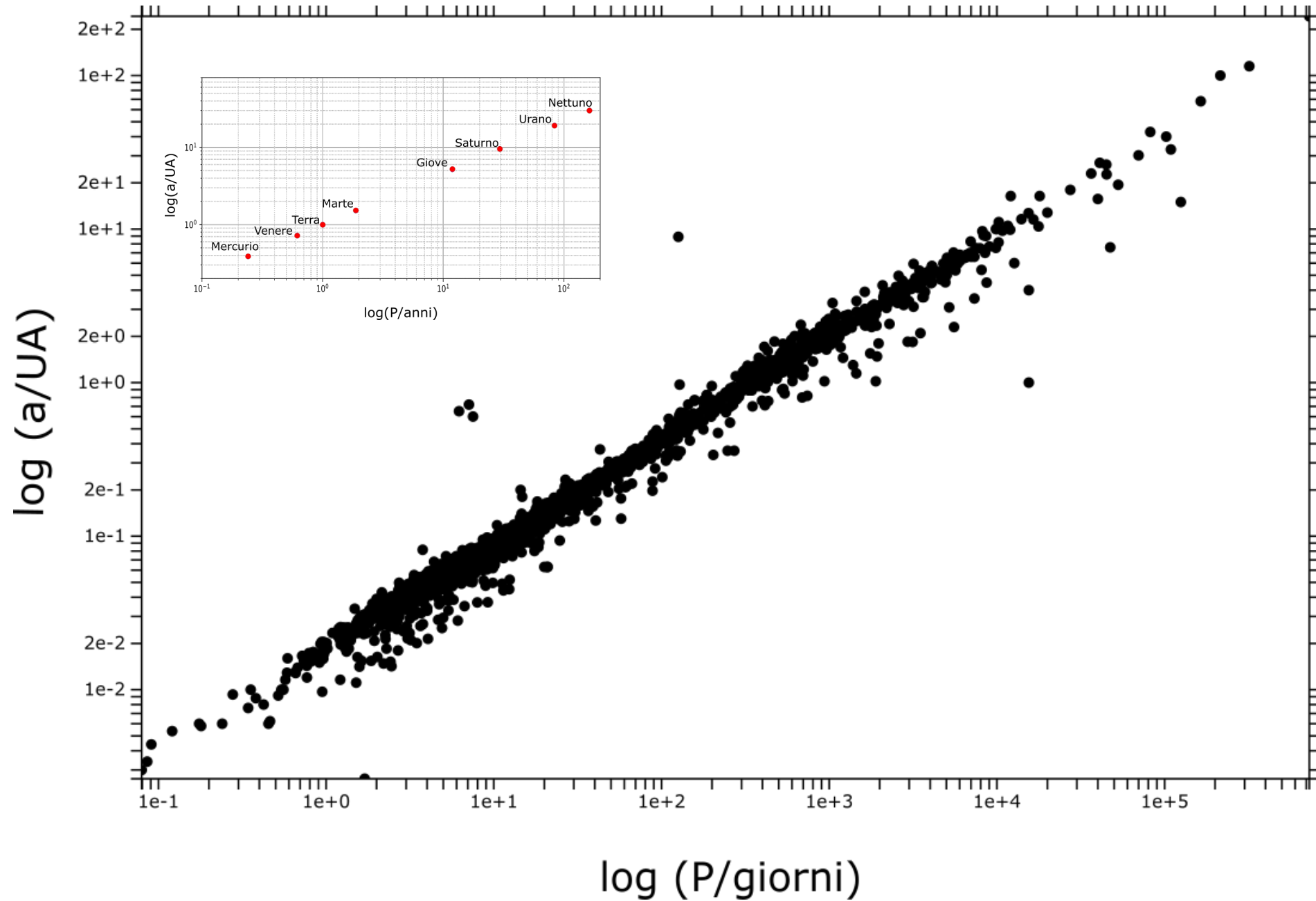
$$R_t = 6.4 \cdot 10^6 \text{ [m]}$$

$$G = \frac{Fr^2}{mM} = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2$$

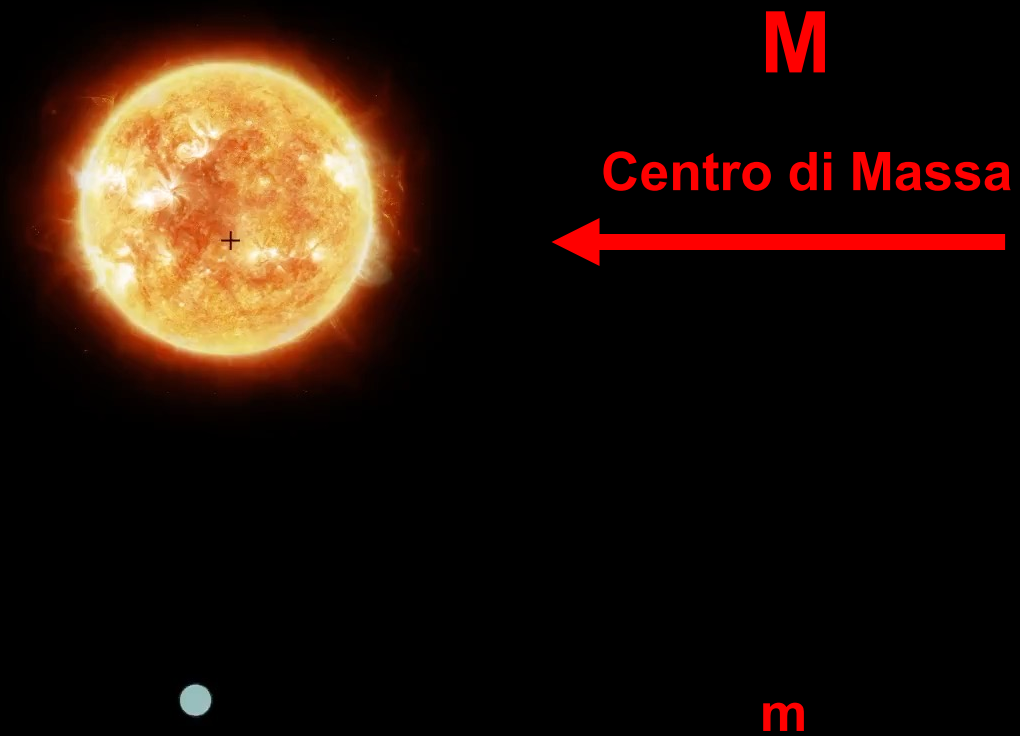


NOTA!

LA LEGGE E' UNIVERSALE!

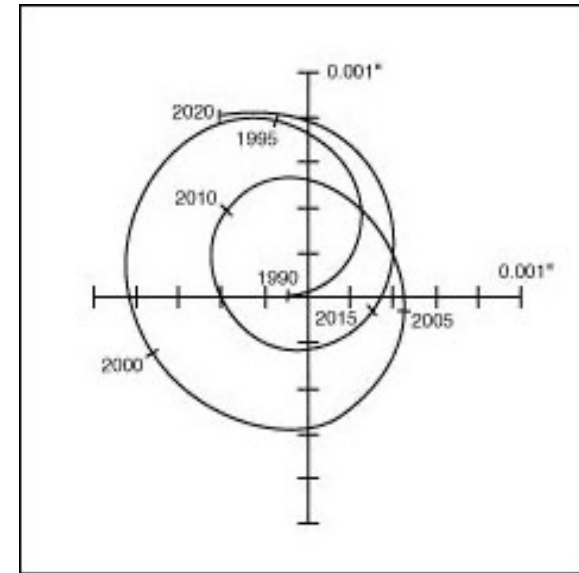


Le stelle non “danzano” da sole!



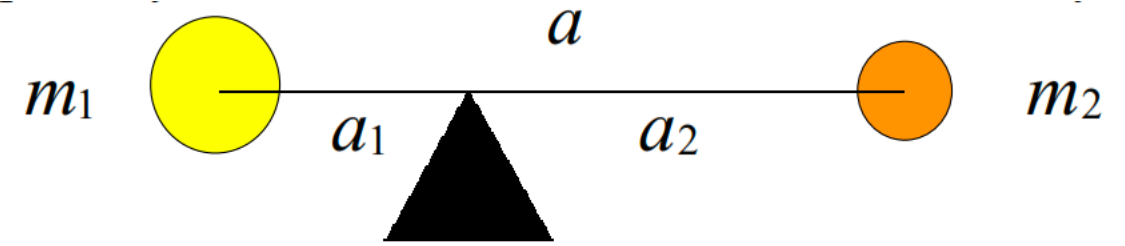
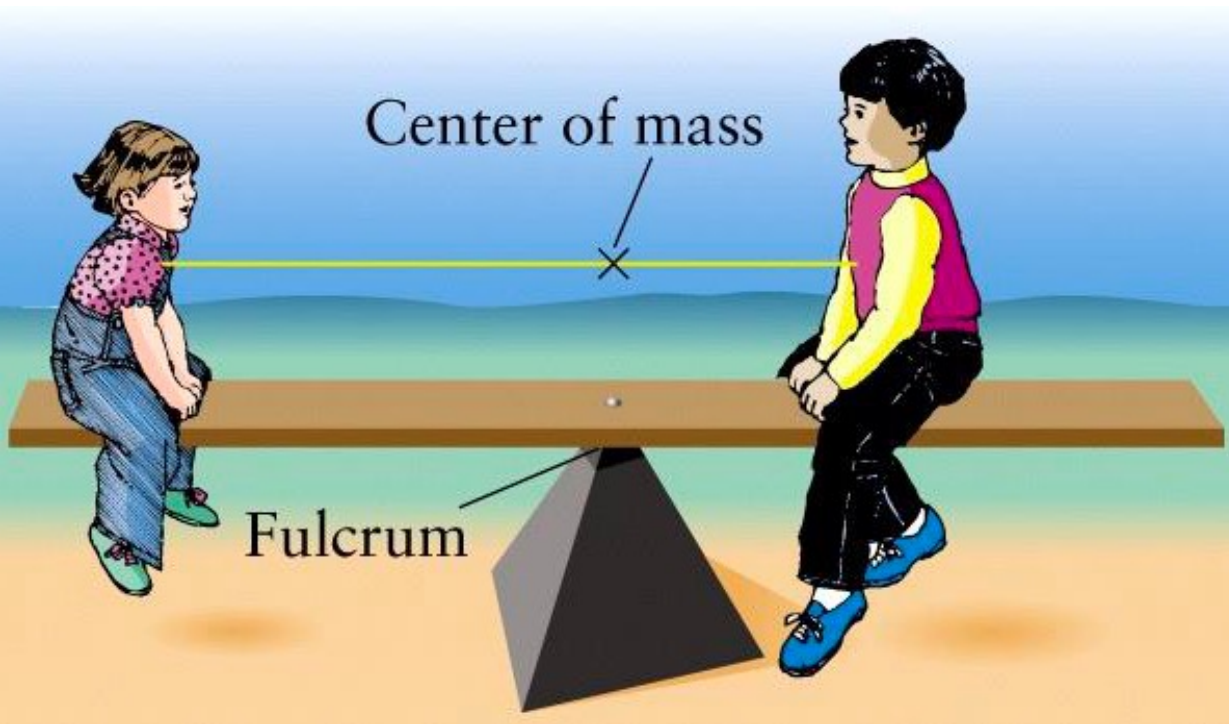
$$d_{Stella-CM} = \frac{m}{M + m} a$$

A causa dell'interazione oggetto-stella, quest'ultima può variare la sua posizione rispetto alle stelle più lontane, che perciò risultano “fisse”. Dalla misura della variazione periodica della posizione relativa degli astri si possono ottenere delle utili informazioni sul pianeta che orbita attorno alla sua stella genitrice. Naturalmente lo spostamento della posizione della stella è tanto maggiore quanto maggiore è il rapporto delle masse e la distanza dell'oggetto dalla stella, secondo la relazione a lato. Nel caso del sistema Sole/Giove, visto da una distanza di 15 anni luce, $d=1$ mas (10 volte inferiore della massima risoluzione di HST).



$$d_{Stella-CM} = \frac{m}{M + m} a$$

Pesiamo una stella



$$a_1 m_1 = a_2 m_2$$

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{a_2}{a_1} = \frac{v_{2r}}{v_{1r}}$$

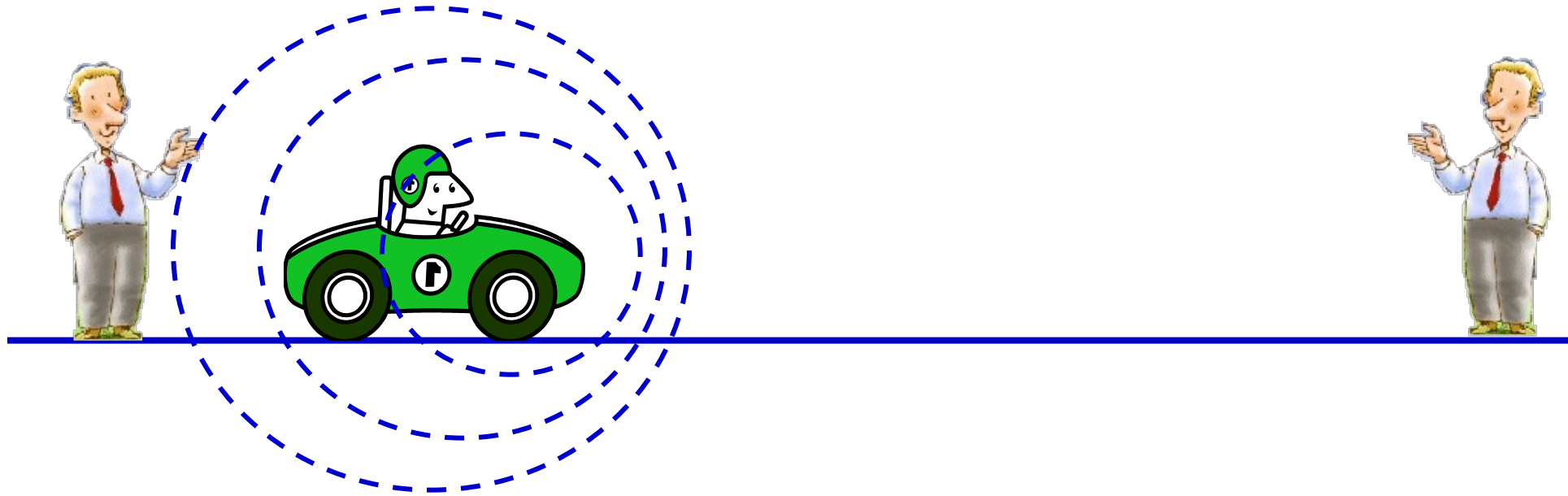
Un astronomo usa la legge di Keplero per stimare la massa di una stella



PERIODO
VELOCITA'



P si misura facilmente: basta osservare qualcosa che si ripete “periodicamente”!
Ma v? Fortunatamente c'è l'effetto Doppler!



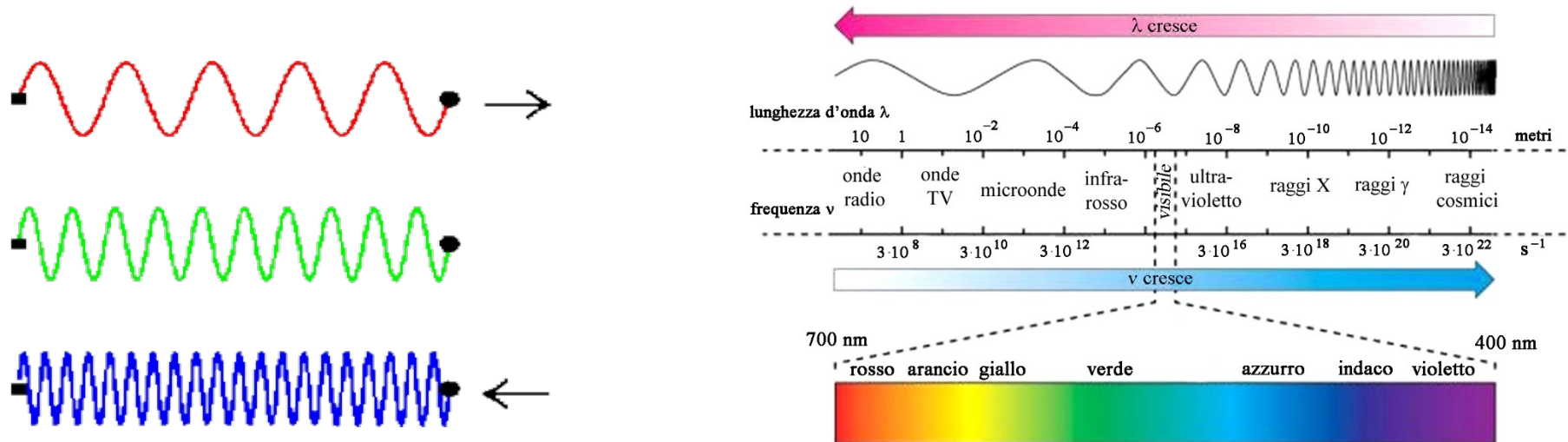
L'effetto Doppler è quel fenomeno per cui sentiamo un suono più acuto quando la sorgente si avvicina e più grave quando si allontana!



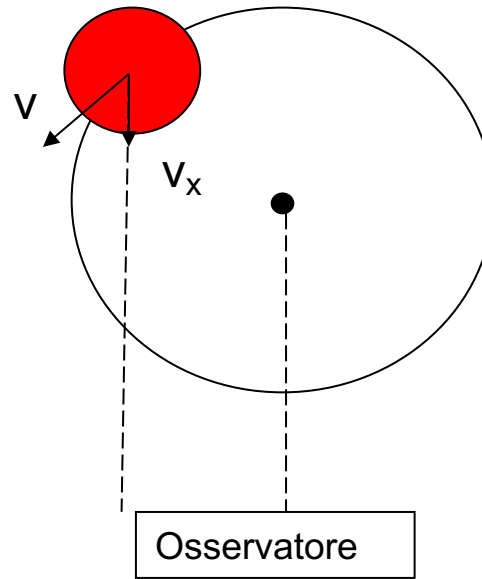
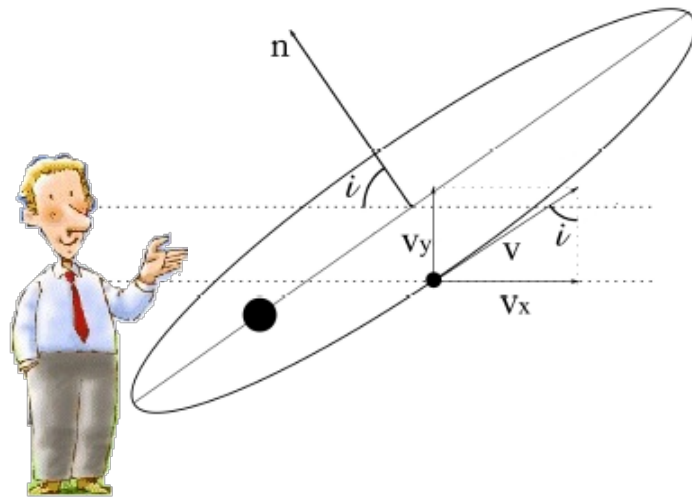
Effetto Doppler: Velocità di un oggetto (quale una galassia)!



Analogamente...una sorgente apparirà più rossa se in allontanamento e più blu se in avvicinamento ad un osservatore!

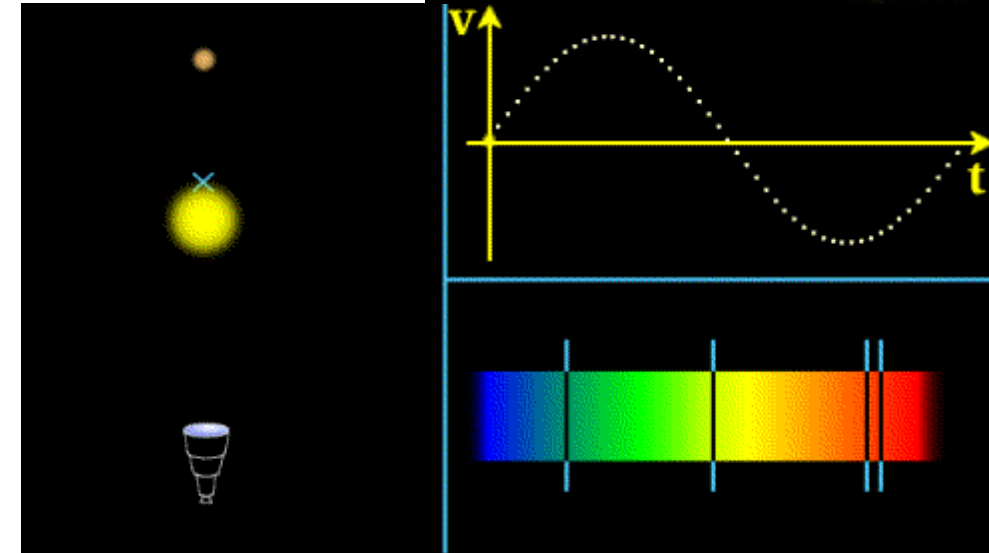
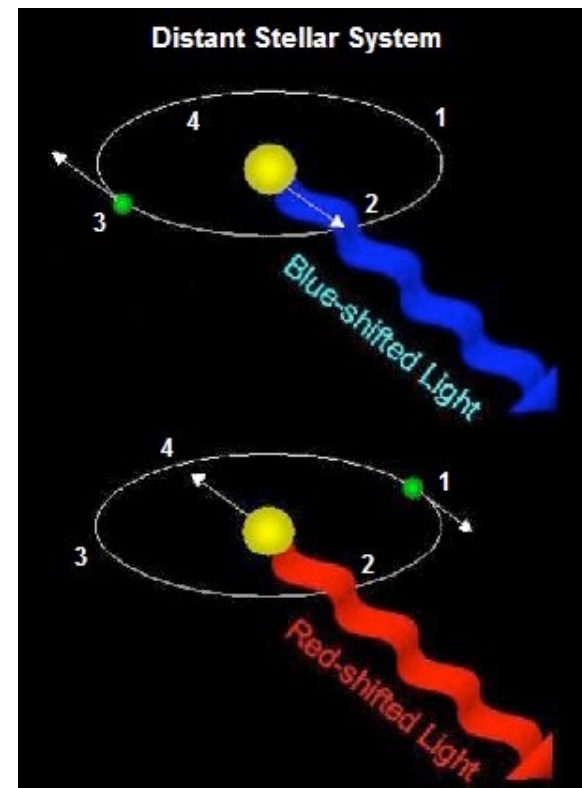


VELOCITA' RADIALI: quello che si osserva e che si misura in pratica!

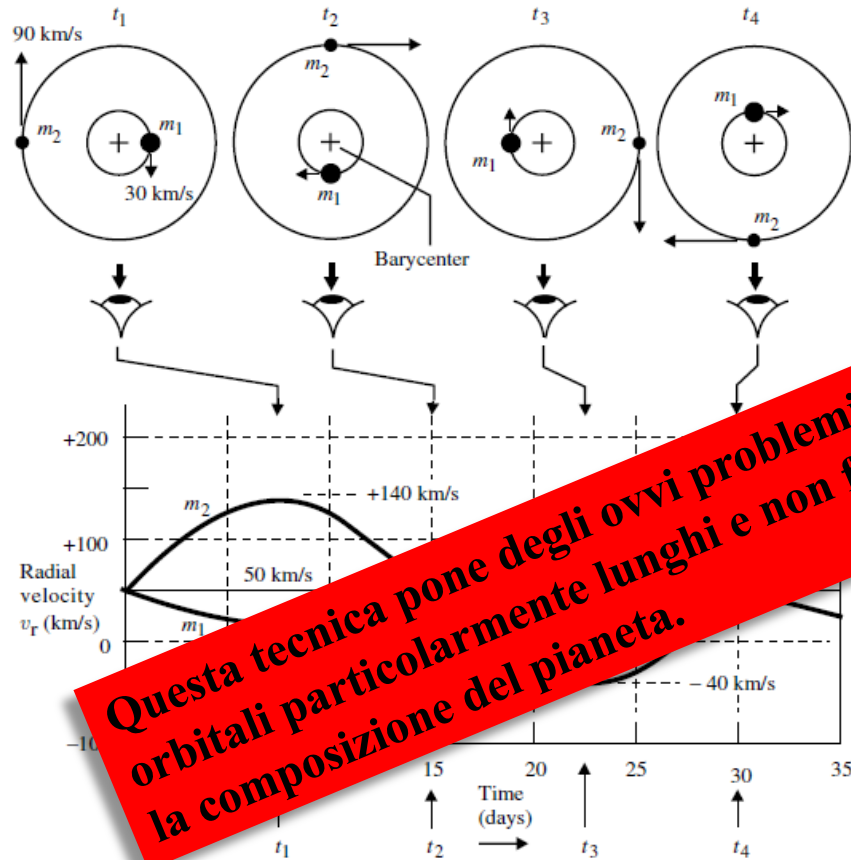


$$v_x = \frac{2\pi a}{P} \sin i,$$

$$v = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} c.$$

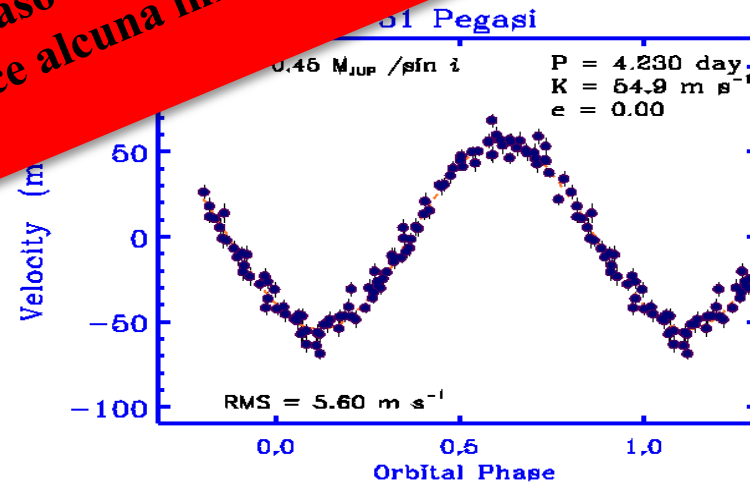


Binarie Spettroscopiche



Se l'asse di rivoluzione del sistema coincide con la linea di vista, lo spostamento Doppler dell'assorbimento della stella è massimo.

Questa tecnica pone degli ovvi problemi nel caso di pianeti poco massivi con periodi orbitali particolarmente lunghi e non fornisce alcuna informazione circa le dimensioni e la composizione del pianeta.

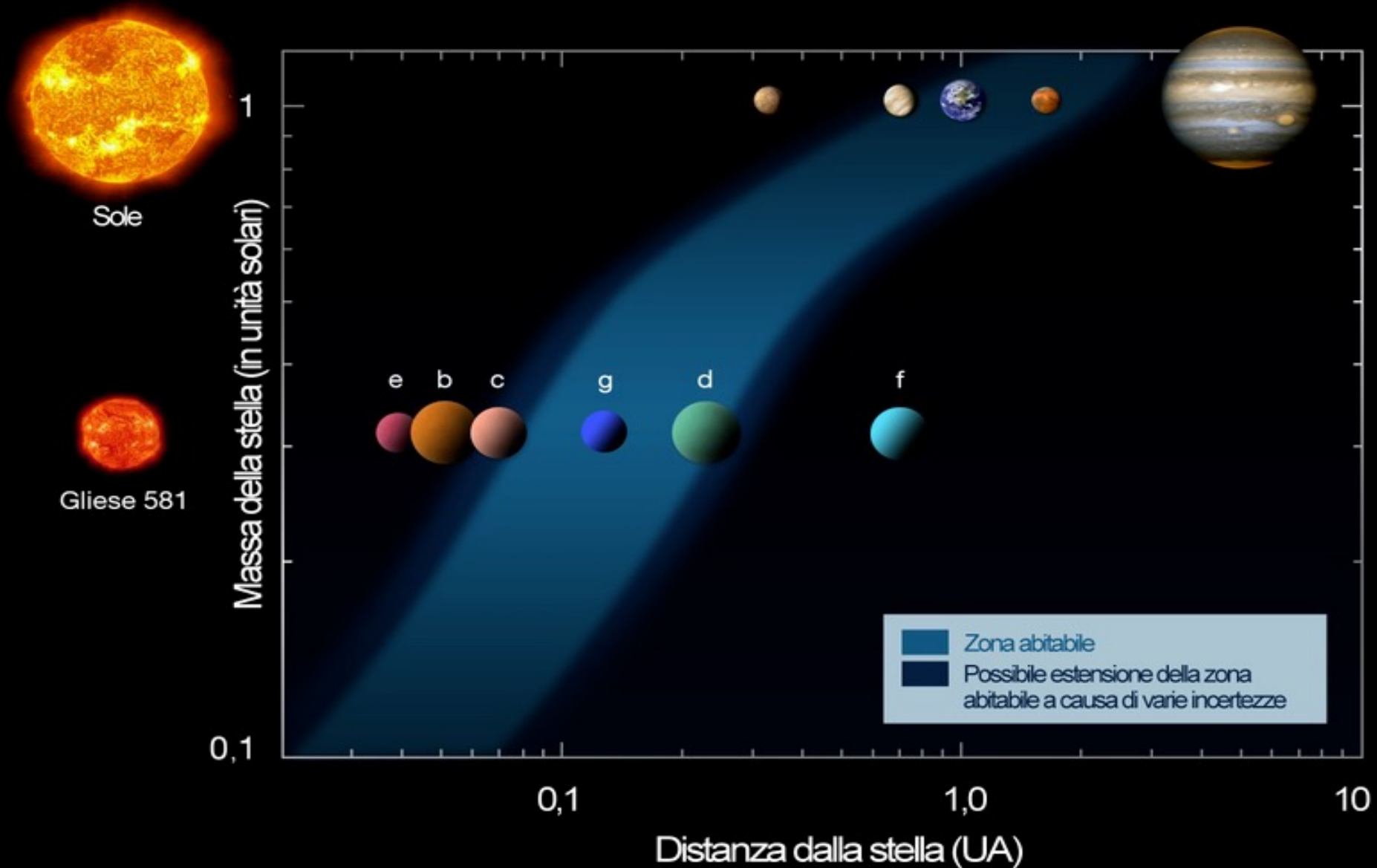


$$P = \left(\frac{4\pi^2}{G(m_1 + m_2)} a^3 \right)^{1/2}$$

$$m_1 + m_2 = \frac{P}{2\pi G} \left(\frac{v_1 + v_2}{\sin i} \right)^3$$

Velocità radiali per scoprire esopianeti:

I limiti delle velocità radiali: sensibilità attuale del m/s $\rightarrow$ cm/s



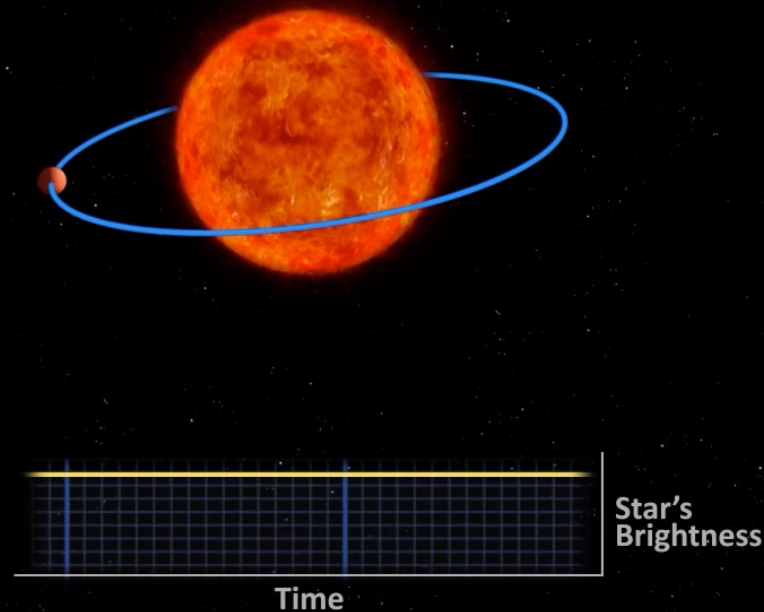
Sistemi rari ma preziosi...

Il passaggio di una stella o un pianeta davanti alla stella compagna produce una diminuzione della luminosità osservata.

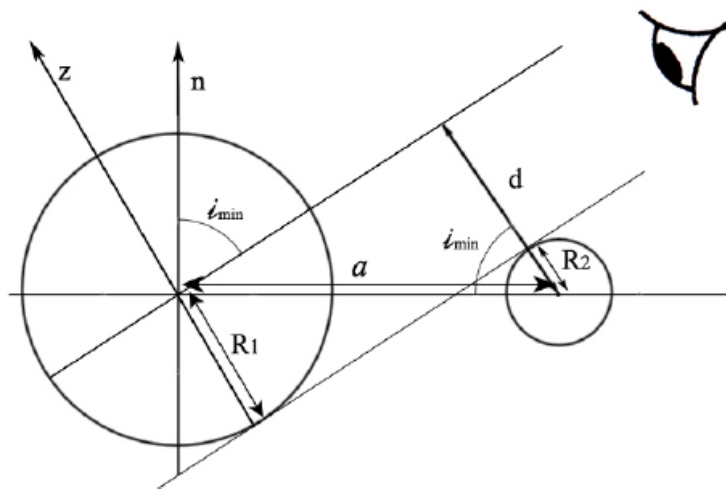
L'effetto è simile ad osservare la luce di un faro lontano intorno al quale vola una falena!

La forma precisa della curva di luce dipende dalla forma e grandezza della falena (Pianeta), da dove si osserva il faro (Stella) e da quanto tempo abbiamo a disposizione!

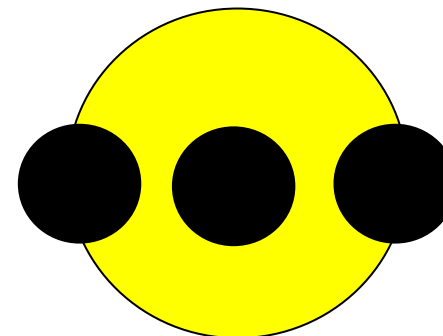
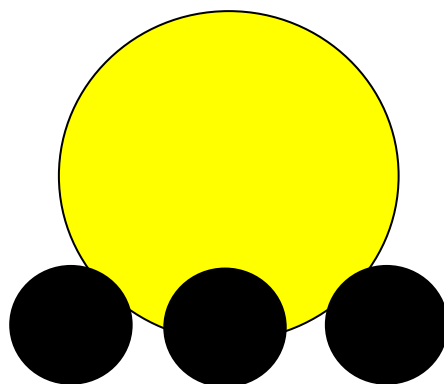
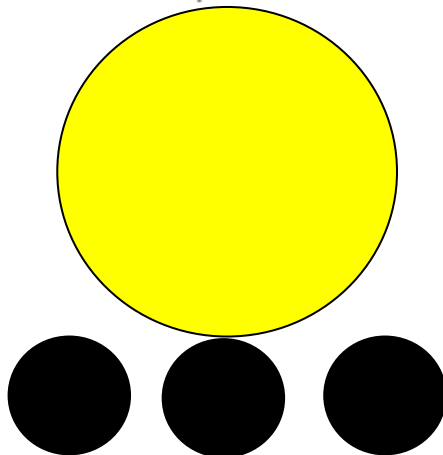
Image: M. Weiss/CfA



Dallo studio di questi oggetti si possono ricavare masse, distanza, dimensioni, ecc.

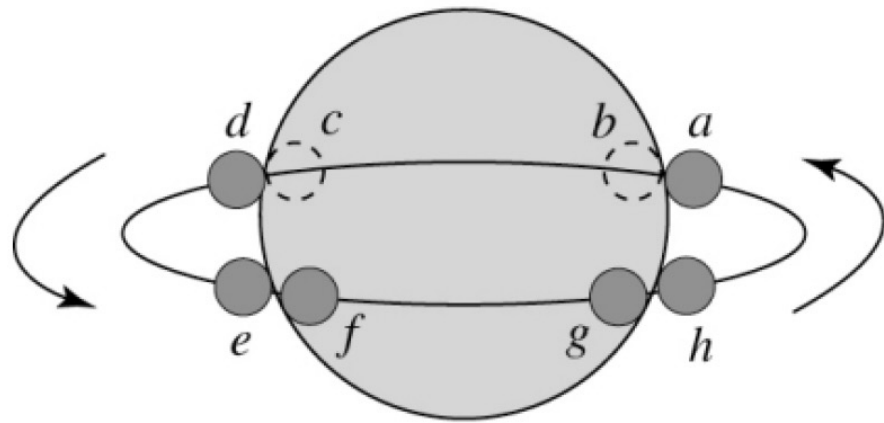


$$\begin{cases} d = R_1 + R_2, \\ d = a \cos i_{\min}, \end{cases}$$

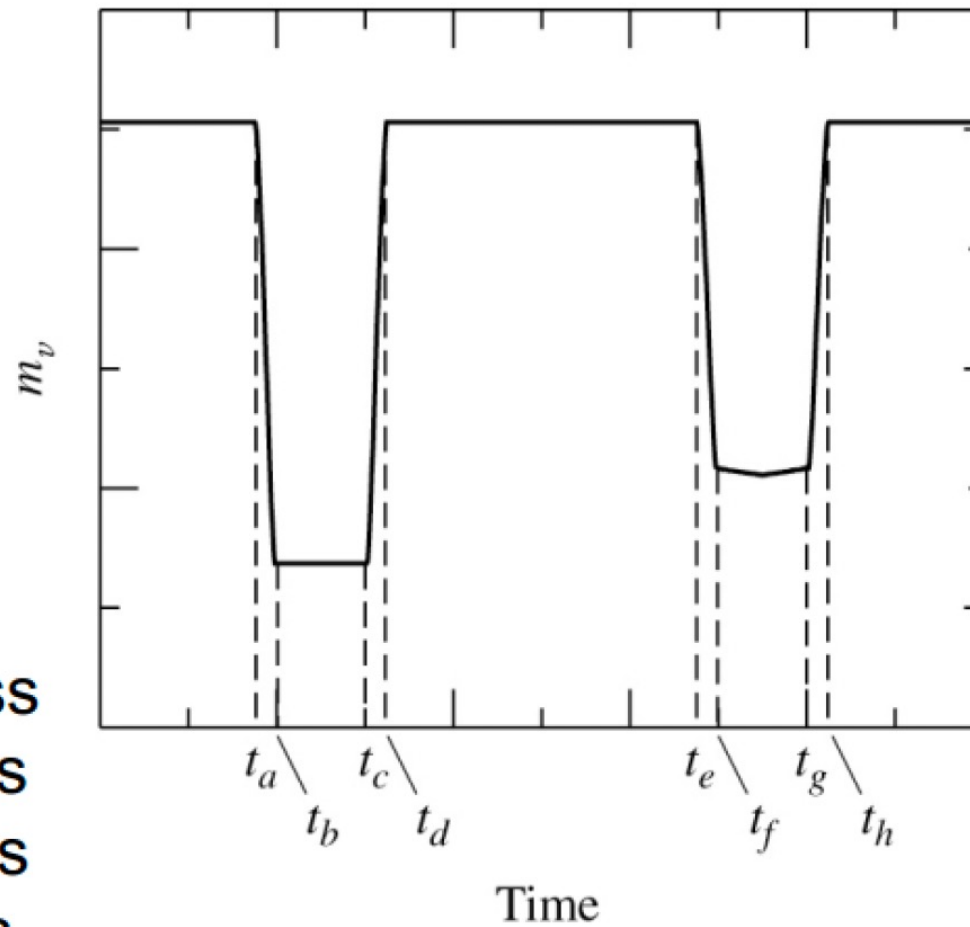


$$R_1 + R_2 = a \cos i_{\min} \implies i_{\min} = \cos^{-1} \left(\frac{R_1 + R_2}{a} \right),$$

Angoli prossimi a 90 gradi!

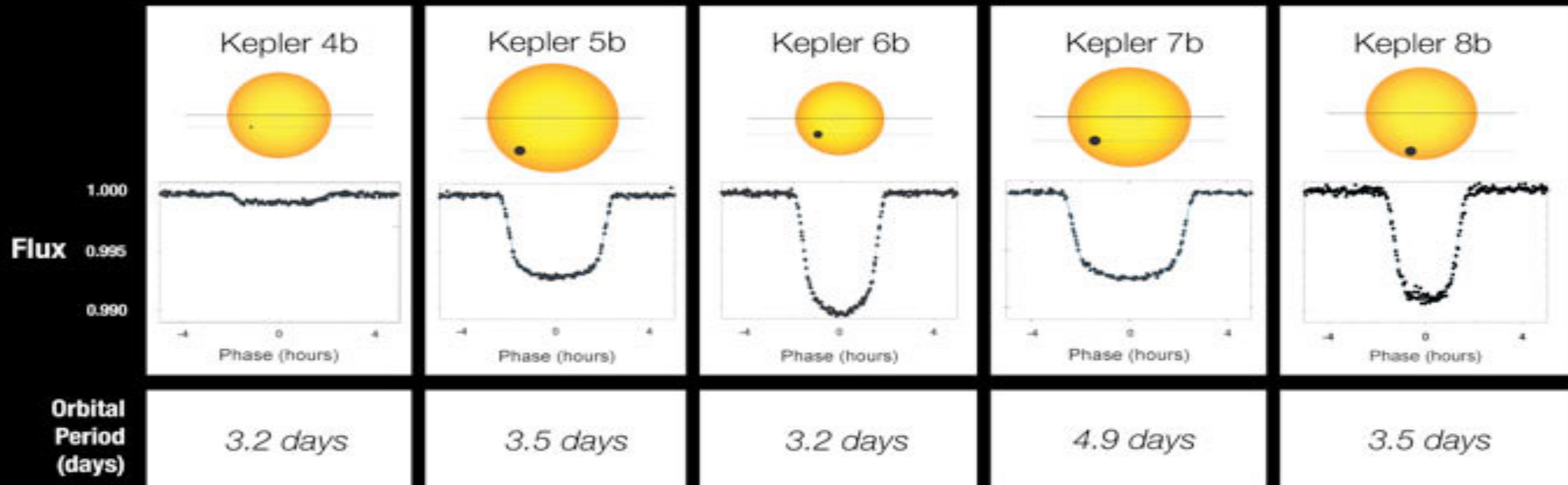


t_a – start of secondary ingress
 t_b – end of secondary ingress
 t_c – start of secondary egress
 t_d – end of secondary egress



$$\frac{F_0 - F_{\text{primary}}}{F_0 - F_{\text{secondary}}} = \left(\frac{T_{e,s}}{T_{e,\ell}} \right)^4$$

Transit Light Curves



Kepler's Small Habitable Zone Planets

As of May 10, 2016

Ad oggi (4281)

Candidati: 2,245

Confermati: 2,342

NELLA ZONA
ABITABILE (FORSE)
30

